

Neue Entwicklungen in der optischen Nachrichtentechnik

Unger, Hans-Georg

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 44, 1993,
S.69-87



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

Neue Entwicklungen in der optischen Nachrichtentechnik

Von **Hans-Georg Unger***, Braunschweig

(Eingegangen am 14. 07. 1993)

1 Einleitung und Übersicht

Glasfasern dämpfen optische Impulse so wenig, daß sie in heutigen Nachrichtennetzen die bis zu 2 Milliarden optischen Informations-Bits pro Sekunde aus Halbleiterlasern Hunderte von Kilometern ohne Regeneration übertragen. Wenn beim Empfang der optischen Impulse anstelle der direkten Umwandlung in elektrische Stromimpulse mit Überlagerungsempfang gearbeitet wird, darf die Faserstrecke zwischen Regeneratoren noch gut hundert Kilometer länger sein. Mit Glasfaserlasern als Zwischenverstärker können es sogar an die tausend Kilometer sein. Wenn die Faserkerne mit erhöhter Brechzahl ausgeführt und so verengt werden, daß sie bei den optischen Wellenlängen geringster Dämpfung die Signalimpulse auch nur noch minimal verzerren, können mit Faserzwischenverstärkern aber ohne Regeneratoren selbst die Tausende von Kilometern transkontinentaler und transozeanischer Verbindungen überbrückt werden. In Zukunft wird man mit schnellen optischen Schaltern bis zu 100 Milliarden Signalimpulse pro Sekunde erzeugen und sie als Glasfaser-Solitonen und mit Faserverstärkern über praktisch unbegrenzte Entfernungen übertragen können. Die Übertragungskapazität alleine läßt sich mit Wellenlängenmultiplex vervielfachen, bei dem viele optische Träger verschiedener Wellenlänge überlagert und in jeweils einer Faser gemeinsam übertragen werden.

Um in den Knotenpunkten zukünftiger Nachrichtennetze Informationsflüsse von vielen Billionen Bits pro Sekunde zu vermitteln, wird man das räumliche Schalten durch zeitliches Verschachteln und durch Verteilen der Signalflüsse auf viele optische Träger verschiedener Wellenlänge erweitern. Für diese optische Vermittlung ebenso wie auch für die Teilnehmeranschlüsse müssen integrierte photonische und optoelektronische Schaltungen, ähnlich wie die integrierten Schaltungen der Mikroelektronik, entwickelt werden. Insbesondere brauchen kostengünstige Teilnehmeranschlüsse eine integrierte Optoelektronik, die Verstärker, Laser, Photodetektoren und optische Send-Empfangsduplexer auf einem winzigen Halbleiterchip zusammenfaßt.

2 Bitraten und Streckenlänge in Fasersystemen

Als vor nahezu zwei Jahrzehnten die ersten Lichtwellenleiter-Systeme entwickelt wurden, dienten sie hauptsächlich zur Breitbandübertragung über größere Entfernungen.

* Univ.-Prof., Dr.-Ing., Dr. h. c. mult. Hans-Georg Unger · Institut für Hochfrequenztechnik der Technischen Universität Braunschweig · 38106 Braunschweig

Im Fernsprechnetzz sollten sie möglichst viel Übertragungskapazität und möglichst große Regeneratorabstände haben. Auch heute ist Breitband-Weitverkehr noch ihre wichtigste Anwendung.

Entsprechend Bild 1 haben solche Fasersysteme als optische Sender Halbleiterlaser, die von den zu übertragenden binären Signalen ein- und ausgetastet werden. Die Ausgangsimpulse von 1 bis 10 mW Leistung werden in der Grundwelle von Einmodenfasern übertragen. Auf der Empfangsseite wandeln Photodioden die optischen Impulse in elektrische Impulse, die verstärkt und entzerrt werden, um danach in Form und zeitlicher Lage regeneriert zu werden.

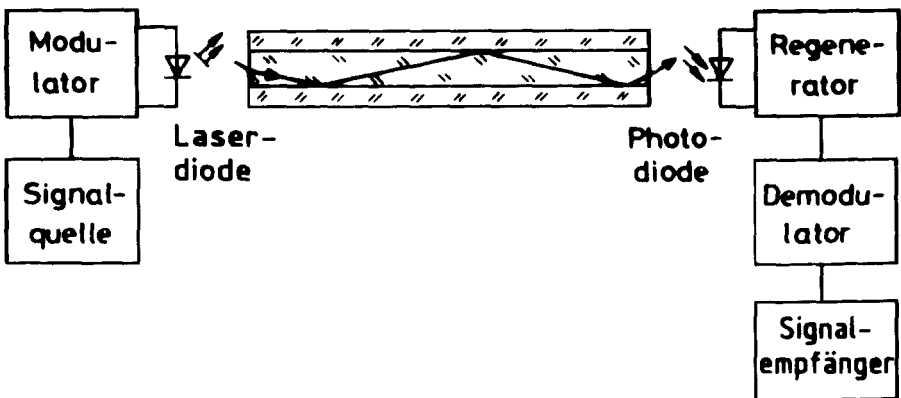


Bild 1:

Schema der optischen Nachrichtenübertragung mit Laser- und Photodiode sowie der Glasfaser als Verbindungsleitung

Damit eine Entscheiderstufe die typischerweise gewünschte Fehlerquote von 10^{-9} einhält, braucht ein idealer rauschfreier Empfänger ohne Impulsnebensprechen 20 Photonen pro Impuls, d. h. im Durchschnitt 10 Photonen pro Bit. Dieses ist die prinzipielle Empfindlichkeitsgrenze des Quantenrauschens, wie sie allein schon durch die Photonenstatistik bedingt ist.

Praktische Photoempfänger rauschen aber, was die Regeneration der Signalimpulse stark beeinträchtigt. Mit einer pin-Photodiode niedrigen Dunkelstromes überwiegt das Rauschen der nachfolgenden Verstärker, und es sind 10000 oder mehr Photonen pro Bit erforderlich, um mit 10^{-9} Bitfehlerquote regenerieren zu können. Wenn mit einer Lawinen-Photodiode die Signalimpulse vorweg verstärkt werden, sind wegen des Lawinenrauschens immer noch mehr als 1000 Photonen pro Bit erforderlich, damit die Bitfehlerquote von 10^{-9} eingehalten wird.

Mit der auf wenige Milliwatt begrenzten Laserleistung am Fasernanfang haben die Signalimpulse anfangs auch eine begrenzte Photonenzahl, die noch dazu umgekehrt proportional zur Bitrate ist. Mit Faserdämpfung von 0,2 dB/km bei 1,55 μm Wellenlänge gehen etwa 5 % der Photonen pro Kilometer verloren. Die maximal mögliche Faserlänge

nimmt darum auch mit der Bitrate ab. Das Produkt von Faserlänge mal Bitrate ist eine aussagekräftige Leistungsgröße für Fasersysteme. Bild 2 zeigt, wie dieses Produkt ausgehend vom Ende der 70er Jahre im Laufe der Zeit gesteigert wurde. Der Maßstab ISDN-km auf der rechten Ordinate von Bild 2 beschreibt das Bitraten-Faserlängen-Produkt mit der Anzahl von Schmalband (64 kbit/s)-ISDN-Kanälen mal Faserlänge in Kilometern.

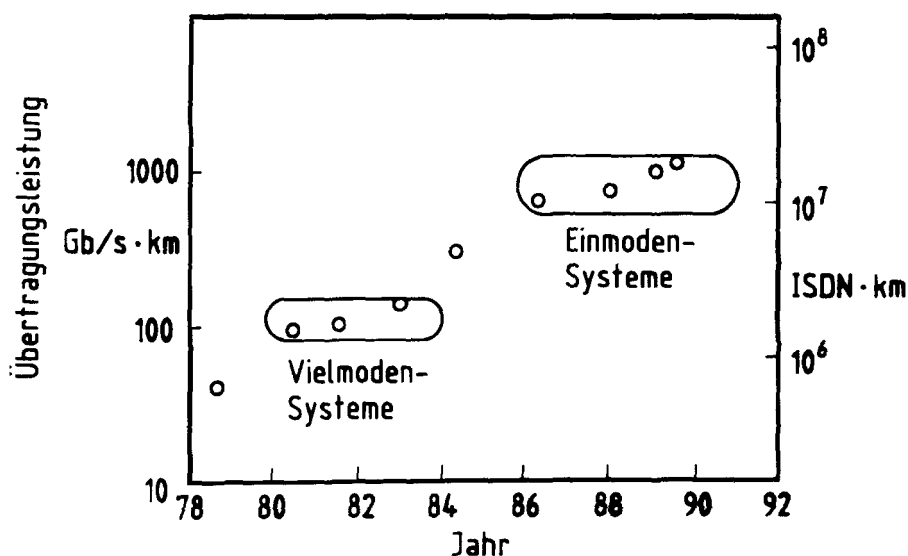


Bild 2:

Entwicklung der Übertragungsleistung von optischen Glasfasersystemen, dargestellt durch das Produkt von Bitrate und Streckenlänge. Die linke Skala gibt dieses Leistungsprodukt in Gigabit (Milliarden Bit) pro Sekunde mal Kilometer an und die rechte Skala als Zahl der Schmalband (64 kb/s) ISDN-Kanäle mal Kilometer

Fasersysteme erreichten ein erstes Plateau bei 100 (Gbit/s) km für diese Übertragungsleistung Anfang der 80er Jahre, als Multimoden-Systeme mit Gradientenfasern voll ausgereizt waren. Ein Plateau etwas unter 1000 (Gbit/s) km wurde in jüngerer Zeit mit ausgereiften Einmoden-Systemen erreicht. Sie übertragen heutzutage einige Gbit/s über Hunderte von Kilometern Faserlänge zwischen Regeneratoren. Mit der Übertragungsleistung von 1000 (Gbit/s)km kann eine einzige Glasfaser im System etwa 50000 ISDN-Kanäle gleichzeitig über Regeneratorabstände von bis zu 300 km übertragen.

3 Wellenlängenmultiplex

Mit Wellenlängenmultiplex kann die Übertragungskapazität von Fasersystemen vervielfacht werden. Dazu werden gemäß Bild 3 mehrere oder sogar viele optische Signalträger in ihren Wellenlängen gegeneinander versetzt gleichzeitig von einer Faser übertragen. Das absolute Dämpfungsminimum der Quarzglasfaser bei $1,55\ \mu\text{m}$ Wellenlänge ist spektral breit genug, um viele Träger unterzubringen. Mit bis zu 20 Trägern im Wellen-

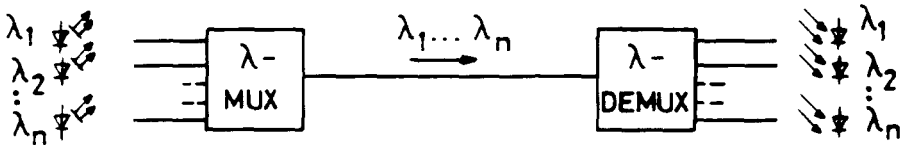


Bild 3:

Übertragung von n optischen Signalträgern verschiedener Wellenlänge $\lambda_1 \dots \lambda_n$ im Wellenlängenmultiplex

längenabstand von ein bis zwei Nanometer wurden schon Übertragungsversuche mit Erfolg durchgeführt. Um die optischen Träger verschiedener Wellenlängen am Eingang der Faser zu überlagern und sie am Faserende wieder voneinander zu trennen, werden Multiplexer bzw. Demultiplexer eingesetzt, die ähnlich wie Spektralanalysatoren mit Beugungsgittern arbeiten. Bild 4 zeigt einen Wellenlängen-Multiplexer mit einem stufenförmigen Reflexionsgitter. Sein Glanzwinkel liegt im Bereich der ersten Beugungsordnung. Dadurch reflektiert es die verschiedenen Wellenlängen aus den vielen Eingangsfasern mit gutem Wirkungsgrad in die eine Ausgangsfaser.

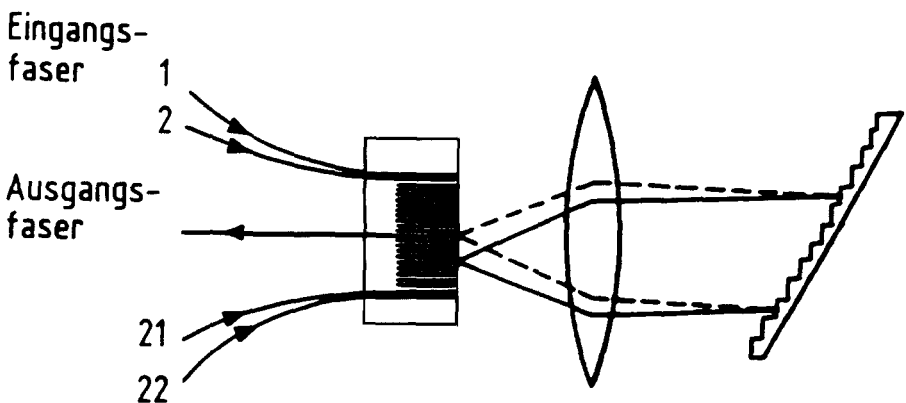


Bild 4:

Gittermultiplexer mit stufenförmigem Reflexionsgitter, um 22 optische Träger verschiedener Wellenlänge aus ebensovielen Eingangsfasern in einer Ausgangsfaser zu überlagern

Am Ende der Faser dient eine Anordnung wie in Bild 4 in umgekehrter Richtung betrieben als Demultiplexer. Sie arbeitet jetzt also wie ein Spektralanalysator und zerlegt das Spektrum optischer Wellen aus der Faser, um jede für sich einer Photodiode zur nachfolgenden elektronischen Verstärkung und Regeneration der Signalimpulse zuzuführen. Man strebt für diese Multiplexer und Demultiplexer planare Bauweise in integrierter Optik an. Mit Wellenlängenmultiplex von 20 und mehr optischen Trägern vervielfacht sich die Übertragungsleistung in Bild 2 um eben diesen Faktor. Praktisch gibt es bis jetzt aber kaum Fasersysteme mit mehr als zwei Trägern im Wellenlängenmultiplex.

4 Überlagerungsempfang

Heutzutage arbeiten Fasersysteme mit direktem optischen Empfang. Bei ihm wandeln Photodioden die optischen Impulse direkt in Impulse elektrischen Stromes um. Mit Überlagerungsempfang, so wie er in der Funktechnik gang und gäbe ist, können viel schwächere optische Impulse noch wahrgenommen und mit niedrigen Fehlerquoten regeneriert werden. Gemäß Bild 5 wird dazu eine empfängerseitig erzeugte kohärente Welle aus einem lokalen Halbleiter-Laser über einen Richtkoppler mit der Signalwelle in der Photodiode überlagert. Die Schwebung, welche dadurch im elektrischen Strom aus der Photodiode entsteht, hat als Frequenz die Differenz zwischen den Frequenzen der Signal- und der lokalen Welle. Die Schwebungsamplitude ist proportional zum Produkt der Amplituden von Signal- und lokaler Welle. Man kann also diese Schwebungsamplitude durch Steigerung der Amplitude der lokalen Welle erhöhen und sie so aus dem Rauschen von Photodiode und nachfolgendem Verstärker herausheben. Auf diesem Wege läßt sich mit Überlagerungsempfang jedenfalls im Prinzip die Grenzemphindlichkeit erreichen, wie sie nur durch die Photonenstatistik begrenzt ist und mit 10 Photonen pro Bit der

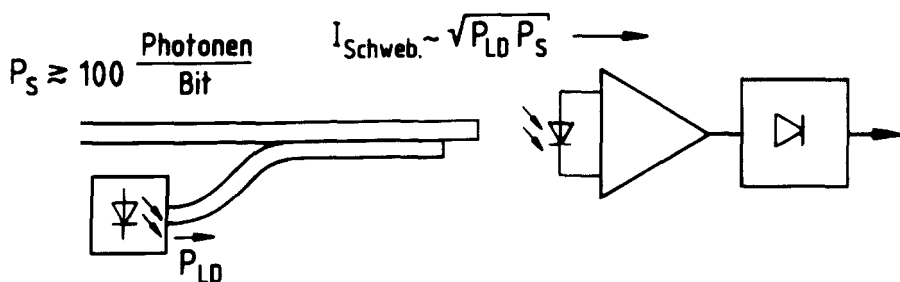


Bild 5:

Im optischen Überlagerungsempfänger wird die Signalwelle mit der Welle aus einer Laserdiode überlagert. Es entsteht dabei eine Schwebung im Strom aus der Photodiode

P_S empfangene Signalleistung
 P_{LD} Leistung aus der Laserdiode
 I_{Schweb} Stromamplitude der Schwebung

Signalwelle für eine Fehlerquote von 10^{-9} auskommt. Frequenzschwankungen sowohl der Signalwelle als auch der lokalen Welle beeinträchtigen aber den Überlagerungsempfang, so daß man praktisch doch eher 100 Photonen pro Bit für 10^{-9} Fehlerquote braucht. Immerhin können damit aber gegenüber den empfindlichsten direkten Photoempfängern 10 bis 20 dB mehr Übertragungsämpfung verkraftet werden, was einer Verlängerung der Faserstrecke zwischen den Regeneratoren und 50 bis 100 km gleichkommt.

5 Faserverstärker

Noch viel leistungsfähigere Fasersysteme ermöglichen auch die Faserverstärker. Optische Verstärkung mit Faserlasern wurde schon vor 3 Jahrzehnten beobachtet. Aber erst in jüngerer Zeit wurde man sich richtig bewußt, was Faserverstärker alles leisten können. Bild 6 zeigt das Grundschemata eines solchen Faserverstärkers. In ihm sind etwa 20 Meter einwellige Quarzglasfaser in ihrem Kern mit Erbiumionen als laseraktive Komponente dotiert. Vorgeschaltet ist ein Richtkoppler aus zwei parallelen miteinander verschmolzenen Fasern, der die Signalwelle direkt durchläßt, aber mit seiner Wellenlängenselektivität die Pumpleistung aus einem Halbleiterlaser in den Faserverstärker einkoppelt. Sie regt die Erbiumionen zu Übergängen in das obere Laserniveau an. Die Besetzung gegenüber dem unteren Laserniveau wird dadurch invertiert, so daß Signale im Band der Übergangswellenlänge bei $1,55\ \mu\text{m}$ durch stimulierte Emission verstärkt werden. Pump- und Signalstrahlung werden dabei beide in der Grundwelle der Faser geführt. Ihre Felder decken sich deshalb nahezu vollständig, und entsprechend vollkommen wird die Pumpleistung zur Signalverstärkung genutzt. Tabelle 1 enthält typische Werte für die wichtigsten Betriebsgrößen von EDFA (erbium-doped fiber amplifier).

Faserverstärker rauschen wegen der spontanen Emission, die gleichermaßen verstärkt wird und sich bei direktem Empfang mit einer Photodiode am stärksten in Form

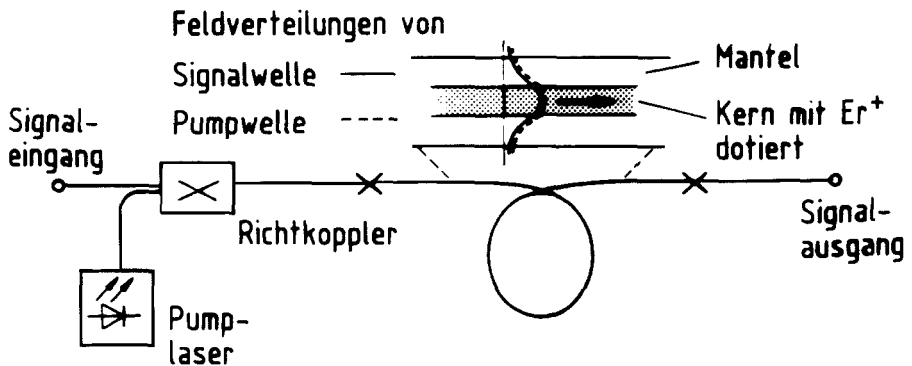


Bild 6:

Faserverstärker mit Erbium dotierter Glasfaser, welche von dem Pumplaser über einen Richtkoppler angeregt wird

Optische Leistungsverstärkung	25 dB
Pumpeffizienz	2 dB/mW
Rauschzahl	3–5 dB
Signal-Sättigungsleistung	30 mW
Bandbreite	35 nm

Tabelle 1:

Typische Werte für die wichtigsten Betriebsgrößen von EDFA (erbium-doped fiber amplifier).

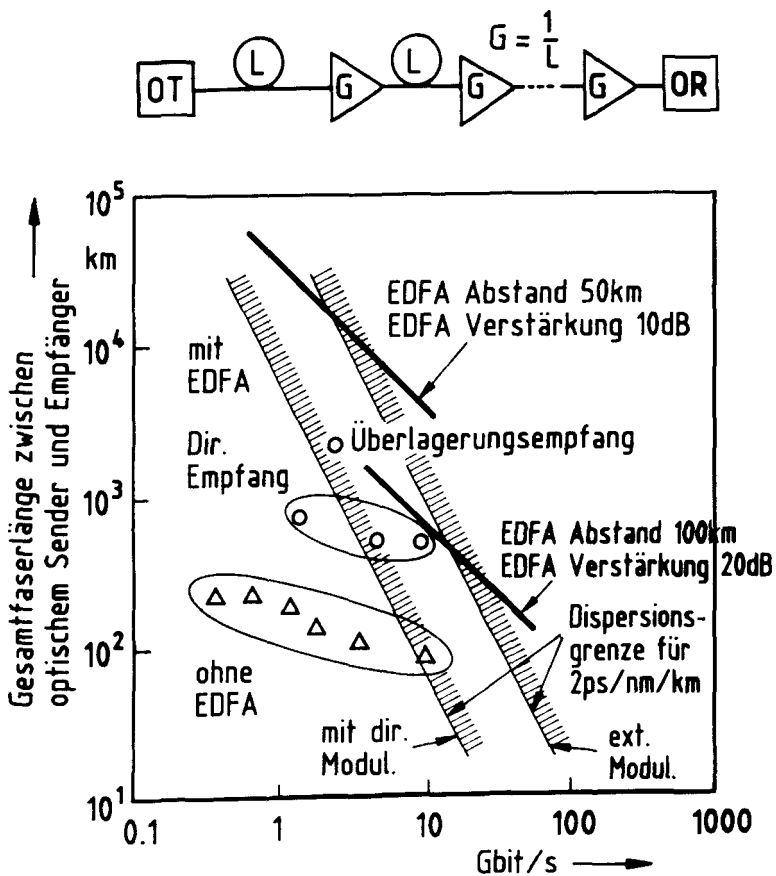


Bild 7:

Gesamtlänge zwischen optischem Sender und Empfänger bzw. zwischen Regeneratoren ohne und mit EDFAs [2] Sendeleistung 1 mW, Faserdämpfung 0,2 dB/km, Bitfehlerquote 10^{-11} , EDFA-Rauschzahl 7 dB

von regellosen Schwebungen mit der Signalwelle bemerkbar macht. Beim optischen Empfang mit dem EDFA als Vorverstärker werden wegen dieses Rauschens die 3 bis 5 dB mehr Photonen pro Bit der Tabelle 1 benötigt als erforderlich sind, um beim Quantenrauschen des idealen Photoempfängers eine bestimmte Bitfehlerquote einzuhalten. In Übertragungsversuchen mit EDFA waren etwa 100 Photonen pro Bit für 10^{-9} Bitfehlerquote erforderlich.

In einer Reihe von weiteren Übertragungsversuchen mit einem EDFA, der als Leistungsverstärker dem optischen Sender am Eingang der Faserstrecke folgt, und einem weiteren EDFA als rauscharmer Vorverstärker vor dem optischen Empfänger, konnte bei Bitraten zwischen 2 und 10 Gbit/s die Übertragungsleistung der Systeme auf 2000 (Gbit/s)km gesteigert werden.

Noch höhere Bitraten-Faserlängen-Produkte lassen sich erreichen, wenn mehrere EDFAs in gleichen Abständen in der Faserstrecke eingesetzt werden. Bild 7 zeigt dazu die Gesamtfaserlänge zwischen einem 1 mW-Sendelaser und einem Empfänger mit optischem Direktempfang, wobei EDFAs in 100 km Abstand (untere Linie) bzw. in 50 km Abstand (obere Linie) eingesetzt sind. Die EDFA-Verstärkung wurde jeweils so eingestellt, daß sie gerade die Faserdämpfung ausgleicht [2]. Das EDFA-Rauschen akkumuliert längs solcher Ketten aus Faserabschnitten mit Faserverstärkern. Es begrenzt schließlich die Gesamtfaserlänge zwischen optischem Sender und Empfänger. Wenn aber die EDFAs dichter aufeinander folgen, brauchen sie auch nur weniger Verstärkung, um die geringeren Verluste der kürzeren Faserabschnitte auszugleichen. Das Rauschen der spontanen Emission wird dann nur noch so viel weniger verstärkt, daß sich weniger Gesamttrauschen akkumuliert und die Gesamtfaserstrecke länger sein kann. Bei gleichmäßig verteilter Verstärkung verschwindet die Faserdämpfung gerade und weder sie noch das Rauschen der spontanen Emission begrenzen die Gesamtfaserlänge zwischen optischem Sender und Empfänger. Die theoretischen Ergebnisse wurden wenigstens teilweise durch Übertragungsversuche bestätigt, von denen einige Ergebnisse als Dreiecke und Kreise in Bild 7 mit eingetragen sind.

6 Dispersionsgrenzen der Übertragungsleistung von Faserstrecken

In Bild 7 sind zwei Linien mit einseitiger Schraffur eingezeichnet. Sie markieren die Grenzen für die Länge von Faserstrecken, wie sie allein durch die Impulsverbreiterung der chromatischen Dispersion der Quarzglasfasern bedingt sind. Wie chromatische Dispersion optische Impulse bei der Glasfaserübertragung verbreitert, veranschaulicht Bild 8. Im Bereich a dieses Bildes ist die Laufzeit auf der Faser in Abhängigkeit von der Strahlungswellenlänge in dem Spektralbereich dargestellt, in welchem die Quarzglasfaser ihre minimale Dämpfung von nur 0,2 dB/km hat. Die Laufzeit ist um so größer und steigt darum auch um so steiler mit der Wellenlänge an, je länger die Faser ist.

Die optischen Signalimpulse haben immer ein endlich breites Spektrum (Bereich b des Bildes 8), selbst wenn sie aus kohärenter Laserstrahlung bestehen. Das bedingt allein

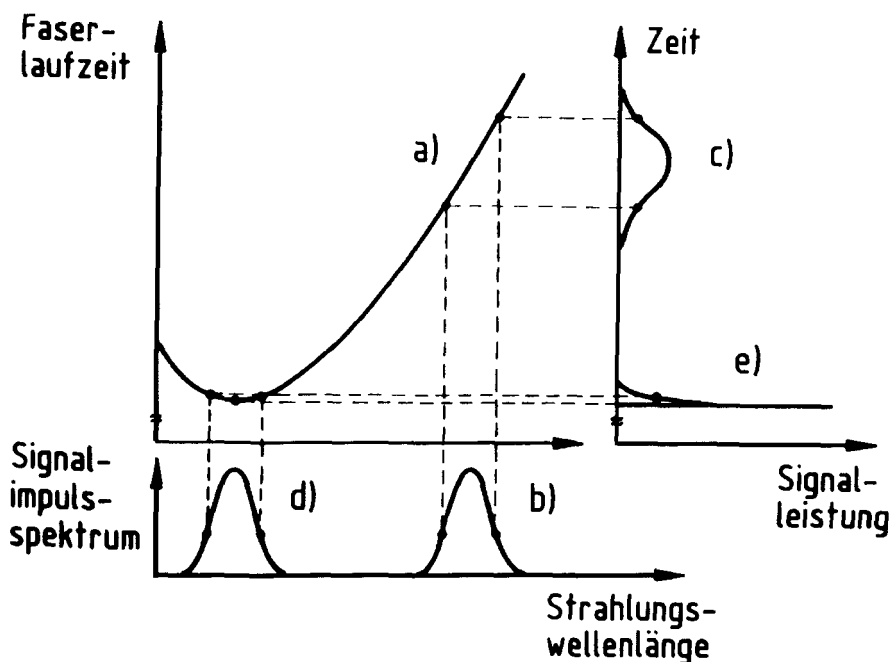


Bild 8:

Verbreiterung von Signalimpulsen durch Laufzeitdispersion in Quarzglasfasern

- a) Laufzeitcharakteristik der Faser
- b) Wellenlängenspektrum des Signalimpulses
- c) durch Laufzeitdispersion verbreiteter Impuls
- d) Signalimpulsspektrum mit Wellenlängen im Minimum der Laufzeitcharakteristik
- e) minimal verbreiteter Signalimpuls

schon der impulsförmige Verlauf der Strahlung. Weiter verbreitert wird dieses Spektrum noch bei der direkten Impulsmodulation der Halbleiterlaser durch die damit verbundenen Wellenlängenschwankungen. Die spektralen Komponenten eines optischen Impulses haben nun mit ihren unterschiedlichen Wellenlängen auch verschiedene Laufzeiten längs der Faser; der Impuls wird dadurch verformt und zwar in erster Linie verlängert. Man erkennt dies, wenn man gemäß Bild 8c das Spektrum des Impulses mit Hilfe der Laufzeitcharakteristik auf die Laufzeitachse projiziert. Mit längerer Faserstrecke versteilert sich die Laufzeitcharakteristik mehr und mehr, wodurch das Bitraten-Faserlängen-Produkt schließlich begrenzt wird.

Zu höheren Werten verschieben läßt sich diese Dispersionsgrenze für das Bitraten-Faserlängen-Produkt, wenn man nicht mit einer Strahlungswellenlänge im steilen Bereich der Laufzeitcharakteristik überträgt, sondern mit der Wellenlänge im Minimum der Laufzeitcharakteristik. In Bild 8d erscheint das Signalimpulsspektrum zu den dafür erforderlichen kürzeren Wellen hin verschoben. Seine Projektion durch die Laufzeitcharakteristik auf die Zeitachse ergibt einen viel kürzeren Signalimpuls am Faserausgang.

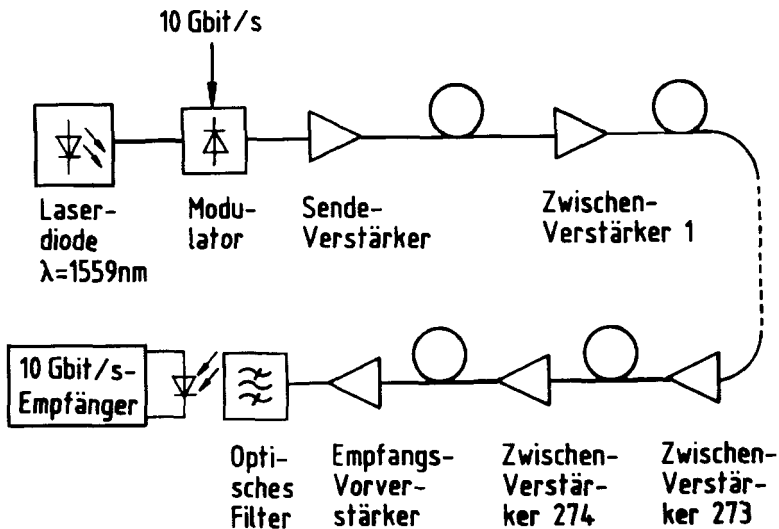


Bild 9:

Übertragungsexperiment für 10 Gb/s Bitrate mit 9040 km dispersionsverschobener Faser und 276 Faserverstärkern [2]. Die Übertragungsleistung beträgt über 90 (Terabit/sec) km.

Statt durch die Steigung der Laufzeitcharakteristik wird der Signalimpuls jetzt nur noch durch die Krümmung verlängert.

Praktisch darf man aber nicht wie in Bild 8d die Strahlungswellenlänge verkürzen. Man würde dann nämlich aus dem Verlustminimum der Faser herauskommen und statt nur 5 % der Photonen mehr als 10 % von ihnen pro Faserkilometer verlieren. Man muß vielmehr entgegengesetzt das Laufzeitminimum zur Wellenlänge des Verlustminimums verschieben. Dazu muß der Faserkern geeignet verengt und seine Brechzahl durch stärkere Dotierung mit Germanium erhöht werden.

Die Dispersionsgrenzen in Bild 7 wurden für solche ‚dispersionsverschobenen‘ Fasern ausgerechnet – allerdings nicht für eine Übertragungswellenlänge genau im Minimum der Laufzeitcharakteristik, welche ja bei Wellenlängenmultiplex immer nur einer von vielen optischen Trägern haben könnte. Es wird vielmehr mit einer Rest-Steilheit der Laufzeitcharakteristik von zwei Picosekunden pro Nanometer Wellenlängen-Breite des Impulsspektrums und pro Kilometer Faserlänger gerechnet, was praktischen Gegebenheiten insbesondere auch bei Wellenlängenmultiplex entspricht. Die untere Dispersionsgrenze in Bild 7 gilt für direkte Modulation eines Halbleiter-Lasers vom DFB-Typ, also mit verteilter innerer Rückkopplung. Sie berücksichtigt die auch beim DFB-Laser nicht ganz zu vermeidenden Wellenlängenschwankungen durch die direkte Impulsmodulation. Bei der oberen Dispersionsgrenze in Bild 7 wird von externer Modulation ausgegangen und nur mit der Verbreiterung der Laserlinie durch die Seitenbänder der Impulsmodulation gerechnet.

Was eine solche ‚dispersionsverschobene‘ Faser in einem System mit Faser-Zwischenverstärkern zu leisten vermag, zeigt sehr eindrucksvoll der Übertragungsversuch in Bild 9. Die Faser ist insgesamt über 9000 km lang. Nach jeweils 33 Faserkilometern sind Faserverstärker eingespleißt. Zusammen mit dem Faser-Leistungsverstärker am Anfang der Strecke und dem Faser-Vorverstärker an ihrem Ende sind es 276. Die gegenüber Bild 6 etwas kürzeren Faserabschnitte kommen mit weniger Verstärkung pro Abschnitt aus, so daß sich auch weniger Verstärkerrauschen akkumuliert. Das Bitraten-Längen-Produkt beträgt 90 (Terabit/s)km. Entscheidend ist bei diesem Versuch aber, daß die 9000 Faserkilometer ausreichen würden, um die längsten Verbindungen auf der Erde herzustellen, beispielsweise auch transpazifisch.

7 Solitonen

Dispersion setzt der Übertragungskapazität und den Streckenlängen die in Bild 7 markierten Grenzen. Um sie zu überwinden muß man sich den nichtlinearen Charakter des Quarzglases der Faser zu Nutze machen. Die Suszeptibilität von Quarzglas ist für schwache elektrische Felder konstant. Bei stärkeren Feldern nimmt sie aber zu. Dementsprechend spürt auch eine optische Welle bei höherer Intensität eine größere Brechzahl. Ein genügend starker optischer Impuls erfährt darum die in Bild 10 dargestellte Selbstphasenmodulation. Sein Zentrum spürt eine höhere Brechzahl und wandert darum langsamer als Front und Schwanz des Impulses. Er expandiert vorne und komprimiert sich hinten. Als Folge davon vergrößert sich die Wellenlänge vorne und verkürzt sich hinten, nimmt also von vorn nach hinten ab. Die Dispersion des Quarzglases bedingt eine Laufzeit, die gemäß Bild 8a mit wachsender Wellenlänge zunimmt. Sie kann also die Impulsverformung durch die Fasernichtlinearität gerade ausgleichen. Es ergibt sich ein Soliton, d. h. ein charakteristischer Impuls bestimmter Form und Dauer, der ohne sich zu ändern längs der Faser wandert. Je nach Kerndurchmesser und numerischer Apertur der Faser dauert ein Soliton 10 ps oder auch länger und hat einige zehn Milliwatt Spitzenleistung.

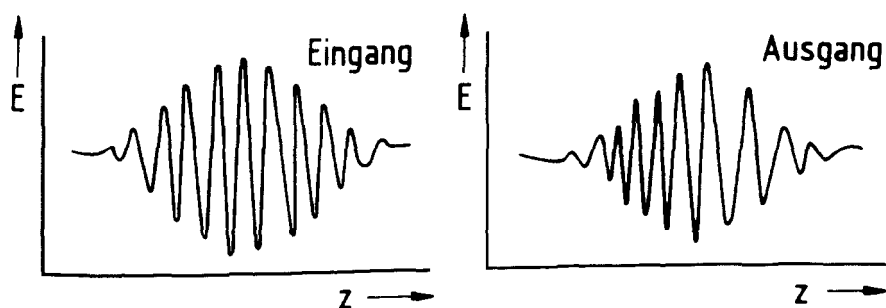


Bild 10:

Selbstphasenmodulation eines optischen Impulses durch eine intensitätsabhängige Brechzahl

Solitonen lassen sich gut mit Halbleiterlasern und Faserverstärkern erzeugen und zwar auch in zeitlich sehr dichter Folge für die Übertragung hoher Bitraten. Um die Solitonen längs der Faser nahe ihrer charakteristischen Spitzenleistung zu halten, muß die Faserdämpfung durch Faserverstärker ausgeglichen werden; es ist ein Faserverstärker mindestens alle 50 km einzusetzen. Unter diesen Bedingungen können Bitraten von 10 Gbit/s und mehr über sehr lange Faserstrecken übertragen werden.

Schließlich gibt es dann aber auch eine maximale Entfernung für diese Solitonenübertragung. Jeder Faserverstärker in der langen Kette rauscht mit seiner verstärkten spontanen Emission, wodurch auch die Verstärkung für die Solitonen entlang der Kette zunehmend schwankt. Das Jittern der Solitonen aufgrund dieser Schwankungen wird schließlich so groß, daß sich zeitlich benachbarte Bits stören. Die Leistungszahl für ein Fasersystem wird durch diesen Solitonenjitter auf etwa 100 (Tbit/s)km begrenzt [3]. Umgehen kann man diese Grenze nur durch wenigstens partielle Taktregenerierung zur Reduzierung des Solitonenjitters [4]. Da diese Grenze aber in näherer Zukunft nicht erreicht wird, hat diese Taktregenerierung zunächst keine praktische Bedeutung.

8 Hochleistungs-Fasernetze und optische Vermittlung

Mit Faserverstärkern läßt sich das Produkt aus Bitrate und Faserlänge bis auf 100 (Tbit/s)km erhöhen. Wenn Wellenlängenmultiplex angewandt wird, kann dieses Produkt noch um mehr als eine Größenordnung gesteigert werden. Damit werden Hochleistungs-Breitbandnetze möglich, die nur mit Glasfasern, also durchgehend optisch, übertragen. Alle größeren Städte oder Bevölkerungszentren in einer Region wie Europa würden mit Glasfaserkabeln voll vernetzt werden können. Überregionale oder interkontinentale Verbindungen könnten auch durchgehend optisch sein, d.h. anstatt elektronischer Signalregeneration mit optischen Faserverstärkern in periodischen Abständen arbeiten.

Die Bitrate des einzelnen optischen Trägers ist durch die Geschwindigkeit begrenzt, mit der elektronische Schaltungen die Pulsfolgen mehrerer verschiedener Kanäle zeitlich verschachteln und auch wieder trennen können. Mit Multiplexern in schnellster GaAs-Technologie werden heute schon Ausgangsraten von 30 Gbit/s erreicht [5]. Dies entspricht auch der Grenzrate, mit denen DFB-Laser getastet bzw. externe Modulatoren betrieben werden können. Noch höhere Bitraten, möglicherweise sogar über 100 Gbit/s hinaus, lassen sich mit voll optischem Zeitmultiplex erreichen [6].

Wenn die einzelne Faser im System noch mehr Information übertragen soll, als es diese höchsten Bitraten können, müßte Wellenlängenmultiplex mit mehreren optischen Trägern eingesetzt werden. Im 35 nm breiten Band des EDFA könnten bis zu 18 optische Träger mit je 2 nm Abstand voneinander untergebracht werden. Der EDFA verhält sich linear für Amplitudenänderungen mit Frequenzen höher als 10 kHz, auch wenn er in die Sättigung angesteuert wird. Er kann darum auch das Vielfache der optischen Kanäle im Wellenlängenmultiplex übertragen, ohne daß sie sich gegenseitig ungebührlich stören.

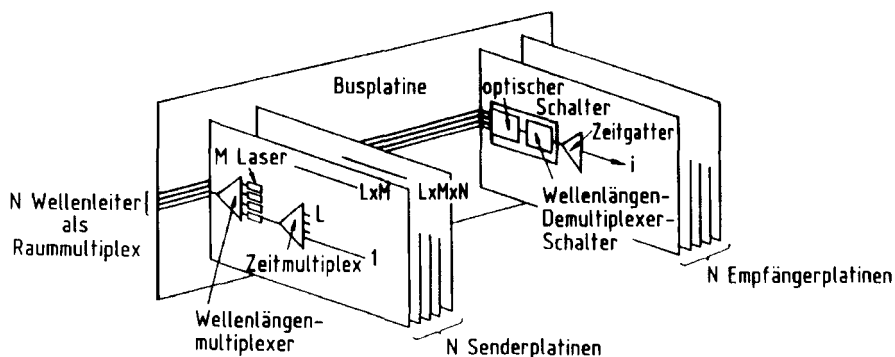


Bild 11:

Grundlegende Architektur eines vieldimensionalen optischen Schalt- und Vermittlungsnetzwerkes [7]

Das Hochleistungs-Fasernetz hat Knoten, in denen jeweils viele Fasern mit sehr hohen Übertragungsraten möglicherweise sogar im Wellenlängenmultiplex zusammenkommen. Die Vermittlungseinrichtungen dieser Knoten müssen jeden Kanal mit seiner jeweils niedrigeren Bitrate aus dem Wellenlängen- und Zeitmultiplex mit jedem Teilnehmer im Gebiet des Knotens verbinden können. Die hohen Bitraten der vielen optischen Träger, die durch solch einen Vermittlungsknoten laufen, können ohne weiteres eine Vermittlungskapazität von 1 Tbit/s übersteigen. Einen so hohen Informationsfluß rein elektronisch zu verkraften, ist praktisch unmöglich. Er kann nur bewältigt werden, wenn nicht nur elektronisch, sondern auch optisch geschaltet und vermittelt wird. Die gleichen drei Dimensionen, nämlich Zeit, Raum und Wellenlänge, wie sie zur Vervielfachung der Übertragungskapazität dienen, müssen auch für die Vermittlung genutzt werden.

Bild 11 zeigt die grundlegende Architektur eines entsprechend vieldimensionalen optischen Schalt- und Vermittlungsnetzwerkes [7]. Es besteht aus einem Stapel von N identischen Senderplatinen, von denen jede mit ihrem optischen Ausgangswellenleiter zu einem der optischen Wellenleiter auf der rückwärtigen Busplatine mit ihren insgesamt N parallelen Wellenleitern führt. Außerdem gibt es noch einen Stapel von N identischen Empfängerplatinen, von denen jede N optische Eingangswellenleiter hat. Jeder Eingangswellenleiter koppelt lose an einen der N Buswellenleiter.

Jede Sendeplatine hat eine Reihe von M Lasern, die M gleichmäßig verteilte Wellenlängen erzeugen. Sie werden miteinander überlagert, verstärkt und speisen den zugehörigen Buswellenleiter. Jeder Laser wird mit dem Zeitmultiplex von L mit einander verschachtelten Impulszügen moduliert.

Jede Empfängerplatine zerlegt das jeweilige Signalvielfach in umgekehrter Reihenfolge. Zuerst selektiert eine optische Schaltmatrix einen der N Buswellenleiter. Dann wählt ein Wellenlängen-Schalter einen aus den M optischen Trägern, und schließlich wird nach optoelektronischer Wandlung mit Photodetektoren auf elektronischem Wege das Zeitvielfach der verschiedenen Impulszüge zerlegt und ausgewählt.

Um die Leistungsfähigkeit eines solchen dreidimensionalen Vermittlungsschaltwerkes zu veranschaulichen, werden als Beispiel 10 Gbit/s für die Datenrate eines Zeitvielfachs von möglicherweise 64 Breitband-ISDN-Kanälen mit je 155 Mbit/s angenommen. Wellenlängenmultiplex von $M = 18$ optischen Trägern und Raummultiplex von $N = 16$ Wellenleitern auf dem Bus führt auf 2,88 Tbit/s als Gesamtdatenfluß und vermittelt zwischen 18432 Breitband-ISDN-Teilnehmern. Die Technologie, welche dafür gebraucht wird, ist heute schon verfügbar.

9 Optoelektronisch integrierter Teilnehmeranschluß

Die Komponenten, aus denen optische Vermittlungsknoten und Endstellen aufgebaut werden, haben optische, optoelektronische und elektronische Funktionen. Sie sollten diese Funktionen zuverlässig und mit langer Lebensdauer ausführen, dabei klein sein und wenig Leistung benötigen; außerdem sollten sie wenig kosten. Alle diese Bedingungen verlangen nach optoelektronischer Integration in monolithischer Form auf Halbleitersubstraten. Monolithisch integrierte photonische und optoelektronische Schaltungen sind insbesondere dort wünschenswert, wo sie in identischer Form in großen Serien gebraucht werden. Optoelektronische Integration ist bereits versuchsweise für optische Sender gelungen mit Lasern und elektronischen Treiberstufen auf einem Chip. Für optische Empfänger sind auch schon Photodioden mit dem nachfolgenden Vorverstärker monolithisch integriert worden. Auch photonische Schaltungen sind versuchsweise monolithisch integriert worden, wie z. B. Laser mit externen Modulatoren oder Wellenlängen-Demultiplexer mit Photodioden.

Ein besonders dringender Fall für monolithische Integration ist der Glasfaser-Teilnehmeranschluß. Nur wenn der photonische bzw. optoelektronische Teil dieses Anschlusses sehr billig hergestellt werden kann, wird es wirtschaftlich sein, im Ortsnetz die Faser bis zum Teilnehmer zu führen. Aus ökonomischen Gründen sollte dann auch für jeden Teilnehmer nur eine Anschlußfaser genügen, diese also im Wellenlängenduplex genutzt werden mit einer Wellenlänge zum Empfangen und einer anderen zum Senden.

Für solche Duplex-Endstellen in monolithisch integrierter Form gibt es verschiedene Vorschläge, darunter auch welche, die schon erfolgreich in Übertragungsversuchen ausprobiert wurden [8]. Bild 12 zeigt unser Konzept. Es arbeitet mit einem Wellenlängenduplexer aus drei parallelen miteinander verkoppelten planaren Wellenleitern [9].

Dieser wird zusammen mit der Laserdiode und ihrer Monitordiode zur Überwachung und Stabilisierung des Laserbetriebes sowie mit der Empfänger-Photodiode und dem Übergangswellenleiter zur stumpf angesetzten Glasfaser auf einem Indiumphosphid-Kristall integriert. Es dient hier also Indiumphosphid als Substrathalbleiter. Auf ihm kann der Verbindungshalbleiter Indium-Gallium-Arsenphosphid einkristallin aufgewachsen werden, um damit die Laser- und Photodioden zu bilden. Aus diesem Verbindungshalbleiter einkristallin aufgewachsen werden dann aber auch die drei parallelen Wellenleiter des Duplexers und der zugespitzte Wellenleiter des Überganges zur Anschlußfaser gebildet.

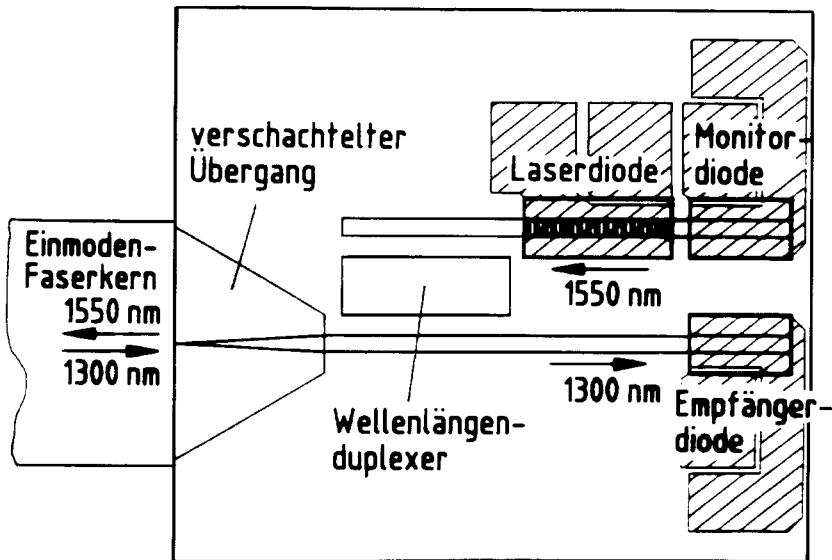


Bild 12: Optoelektronisch integrierter Teilnehmeranschluß mit Sende-Empfangs-Duplexer
 Sendewellenlänge 1550 nm
 Empfangswellenlänge 1300 nm

Der Lasersender strahlt in den einen der äußeren Wellenleiter ein. Seine Ausgangsleistung koppelt längs des Duplexers vollständig auf den anderen äußeren Wellenleiter über und tritt durch den Übergang in die Anschlußfaser aus. Um diese vollständige Leistungskonzersion zu erreichen, ist der zentrale Wellenleiter des Duplexers so bemessen, daß eine seiner höheren Wellen bei der Sendewellenlänge mit gleicher Geschwindigkeit in Längsrichtung wandert wie die Wellen der beiden äußeren Wellenleiter [10].

Bild 13a zeigt das Ergebnis einer numerischen Analyse dieses Vorganges an Hand der entsprechenden Intensitätsverteilung der Wellen längs der drei Wellenleiter und in Querrichtung. Die Glockenkurve am Anfang des einen äußeren Wellenleiters und am Ende des anderen stellen die Welle aus der Laserdiode dar, welche in den Duplexer eintritt und am Ende aus dem anderen äußeren Wellenleiter austritt. Der zentrale Wellenleiter übernimmt die Leistung aus dieser Laserwelle in derjenigen seiner Eigenwellen, welche in Querrichtung zwei Intensitätsmaxima hat. Er reicht diese Leistung dann aber umgehend an den anderen äußeren Wellenleiter weiter, in dem er in ihm die Welle mit wiederum glockenförmiger Intensitätsverteilung anregt.

Bei der Empfangswellenlänge gibt es anders als bei der Sendewellenlänge im zentralen Wellenleiter des Duplexers keine Welle, die mit gleicher Geschwindigkeit in Längsrichtung läuft wie die Wellen in den beiden äußeren Wellenleitern. Darum wird bei dieser Wellenlänge keine Strahlungsleistung zwischen den parallelen Wellenleitern des Duplexers ausgetauscht. Empfangssignale, wie sie von der Faser kommend durch den Wel-

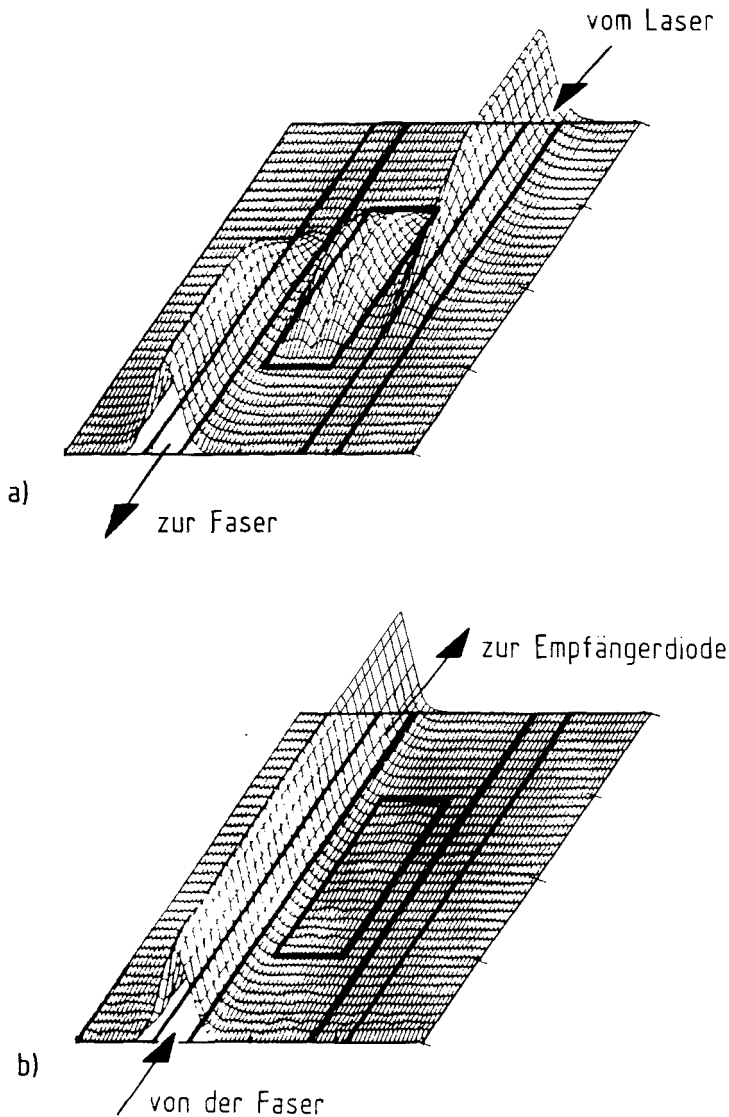


Bild 13: Intensitätsverteilungen von Sende- und Empfangswelle im Wellenlängen-Duplexer des optoelektronisch integrierten Teilnehmeranschlusses

- a) Bei der Sendewellenlänge wird das Signal vom Laser kommend von einer Welle des zentralen Wellenleiters übernommen und ebenso an den Anschluß-Wellenleiter zur Faser übergeben
- b) Bei der Empfangswellenlänge durchläuft das Signal von der Faser kommend den äußeren Wellenleiter direkt zur Photodiode

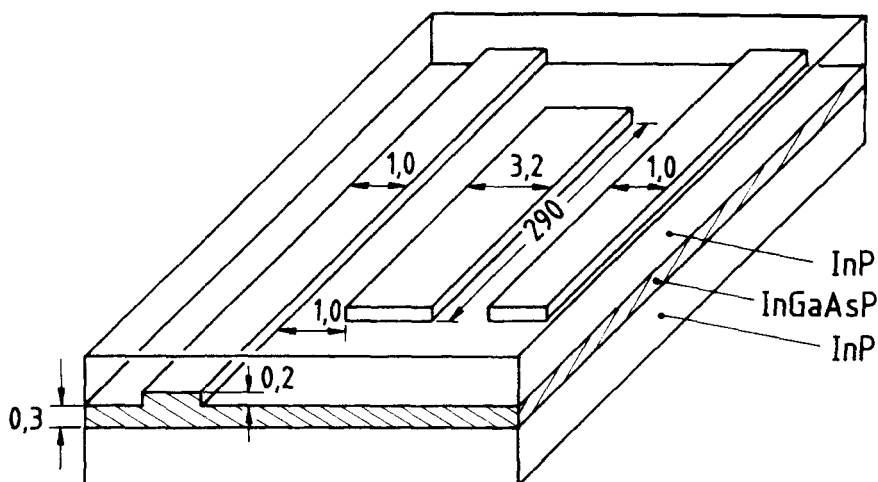


Bild 14:

Aufbau und Abmessungen in Mikrometern des Sende-Empfangs-Duplexers als monokristalline Struktur auf Indiumphosphid-Kristall als Substrat [11]

lenleiterübergang in den einen äußeren Wellenleiter gelangen, durchlaufen diesen Wellenleiter ohne jede Leistungskonversion und erreichen in voller Größe die Empfangsdiode. Bild 13b veranschaulicht diesen Vorgang wieder an Hand des Ergebnisses der schon genannten numerischen Analyse.

Bild 14 zeigt im Detail, welche Form und Abmessungen der Duplexer nach unseren Berechnungen haben muß [11]. Er besteht aus einer nur 300 Nanometer dicken Schicht aus Indium-Gallium-Arsenphosphid mit drei 200 Nanometer hohen Rippen als Wellenleiter, die 1 bzw. 3.2 Mikrometer breit sind. Diese Schicht mit ihren Rippen ist in Indiumphosphid eingebettet, mit dem sie zusammen mit den anderen Komponenten einen einkristallinen Chip bildet. Der ganze Duplexer ist kaum 0,3 Millimeter lang. Dementsprechend braucht der ganze optoelektronisch integrierte Send- und Empfangschip auch nur ein bis zwei Millimeter lang und sogar nur Bruchteile eines Millimeters breit zu sein.

Zur Herstellung solcher optoelektronischen integrierten Schaltungen dienen Verfahren zum Kristallwachsen und lithographischen Strukturieren, die sich teils aus der Mikroelektronik entwickelt haben, teils aber auch ganz neu entstanden sind. Die Feinheit und Präzision der Strukturen sprengt jedenfalls die Anforderungen der Mikroelektronik. Mit den Abmessungen im Nanometerbereich ist es eine Nanotechnik, die hier über die Mikrotechnik hinaus zu entwickeln ist.

Daß sich insbesondere auch der Duplexer mit seinen winzigen Querschnitts-Dimensionen und seinen hohen Ansprüchen an ihre Genauigkeit herstellen läßt, zeigen die Meßergebnisse in Bild 15. Es sind die Intensitätsverteilungen am Ausgang, für die Sende- und Empfangswellenlänge aufgetragen. Mit ihren Glockenkurven bestätigen sie

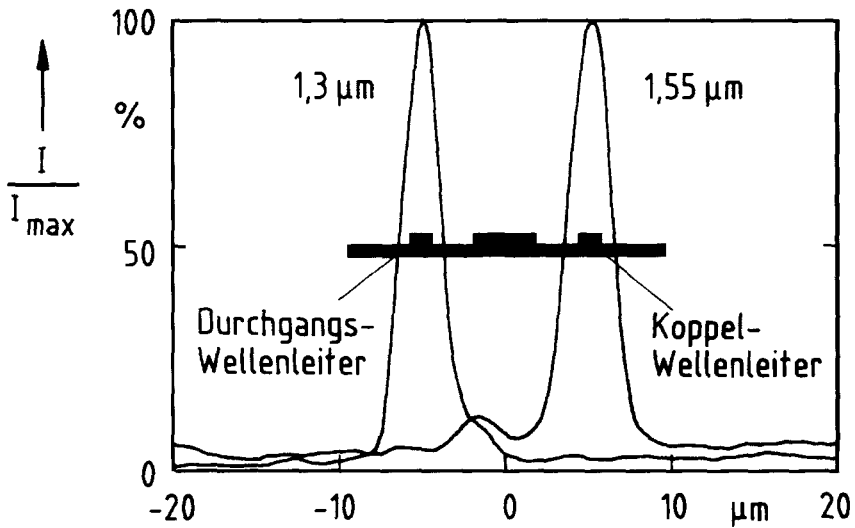


Bild 15: Gemessene Intensitätsverteilungen am Ausgang des Sende-Empfangs-Duplexers. Die Verteilung mit dem rechten Maximum wurde bei Anregung des Durchgangswellenleiters mit der Sendewellenlänge gemessen und die Verteilung mit dem linken Maximum bei Anregung mit der Empfangswellenlänge [12]

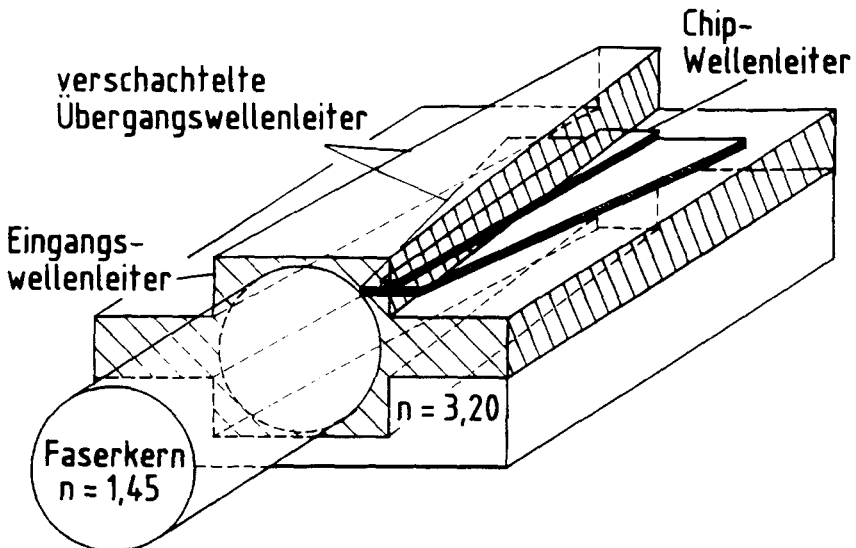


Bild 16: Faser-Chip-Kopplung mit verschachtelten Übergangswellenleitern

die Erwartungen der numerischen Analyse nach Bild 12 und zeigen, daß der Duplexer zufriedenstellend arbeitet.

Kritisch ist auch der Übergang von der Faser mit ihrem 10 µm dicken Kern auf den Chip-Wellenleiter, der eine nur ein bis zwei Mikrometer breite Rippe hat. Um das Faserende mit noch akzeptablen Justiertoleranzen einfach stumpf auf die Chipkante aufsetzen zu können, ist der eigentliche Übergang zum Chip-Wellenleiter gemäß Bild 16 mit auf dem Chip integriert. Er besteht aus den ineinander verschachtelten und gegeneinander auslaufenden Übergangs-Wellenleitern, deren Struktur aber mit wenigen Epitaxieschritten gemeinsam mit den anderen Elementen auf dem Substrat hergestellt werden kann [13].

Der hier behandelte Sende- und Empfangschip ist nur ein Beispiel für optoelektronische Integration, allerdings ein sehr wichtiges, bildet er doch den Schlüsselbaustein für die Glasfaser im Teilnehmernetz. Mit optoelektronischer Integration werden auch noch andere Aufgaben bei der optischen Übertragung und Vermittlung zu lösen sein. In Zukunft wird damit das ganze leitungsgebundene Nachrichtennetz von Endstelle zu Endstelle aus Fasern bestehen und weitgehend auch rein optisch durchgeschaltet.

Literatur

- [1] Millar, C. A.: Fiber amplifiers in optical telecommunications – a perspective. *BT Technol. Journ.* 9 (4) 1991, p. 5–11.
- [2] Nakagawa, K., et al.: Trunk and distribution network application of erbium doped fiber amplifier. *Journ. Lightwave Technol.* 9 (2) 1991, p. 198–208.
- [3] Nakazawa, M.: Optical soliton communication using erbium doped fiber amplifiers. 17th ECOC Paris, Sept. 1991.
- [4] Kubota, H., et al.: Soliton transmission control in the time domain. *OFC '92*, p. 107.
- [5] Daniel, D., et al.: Ultrahigh-speed 4:1 and 2:1 Multiplexer ICs using AlGaAs/GaAs HBTs. *OFC '92*, p. 211.
- [6] Haner, M., et al.: Optical demultiplexing of terabit packet using a nonlinear waveguide grating coupler. *OFC '92*, p. 15.
- [7] Healey, P., et al.: Photonic switching and interconnect for future network nodes. *BT Technol. Journ.* 9 (4) 1991, p. 19–29.
- [8] Koch, T. L., et al.: Simple In-line Bi-Directional 1.5 µm/1.3 µm Transceivers. 12th IEEE International Semiconductor Laser Conference, September 1990.
- [9] H. G. Unger: Konzepte für Glasfasersysteme mit Wellenlängenmultiplex in: *Stand und Entwicklungsaussichten der optischen Nachrichtentechnik* p. 135–162, FTZ Darmstadt 1981.
- [10] Xu, W., u. Unger, H.-G.: Wavelength-selective Optical Waveguide Couplers with Three Parallel Waveguides. *Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft* Band 37, 1985, S. 103–126.
- [11] Stuwe, P., und Unger, H.-G.: Vectorial analysis of triple rib guide heterostructures as wavelength duplexers. *Microwave and optical Technology Letters* Band 4, Heft 11, 1991, S. 479–485.
- [12] Schwander, T., et al.: Entwurf und Herstellung von wellenlängenselektiven 3-Wellenleiter-Richtkopplern in InGaAsP/InP Materialsystem. *Frequenz* Band 45, Heft 9–10, 1991, S. 221.
- [13] Stuwe, P., et al.: Low loss fiber-chip connections with optimized butt-joints and novel integrated optical taper. *Frequenz* Band 45, Heft 9–10, 1991, S. 233.